
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛЯНИХ І АЛЮМОСИЛІКАТНИХ МІКРОСФЕР

Казимиренко Ю. О.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-5>

ВСТУП

Сучасний попит на поліфункціональні композиційні матеріали зумовлює розвиток технологій і розширення сировинної бази для їх створення. Екстремальні умови експлуатації вимагають від розробників виготовлення легковажних матеріалів, здатних витримувати динамічні, термоциклічні, гідростатичні навантаження та працювати в умовах теплових, електромагнітних, іонізуючих випромінювань та корозійних середовищ. Надання цих спеціальних властивостей здійснюється за участю неорганічних мікросфер, які вводяться у певній кількості до складу композицій.

Це скляні, керамічні, вуглецеві, металізовані та інші види мікросфер, що виробляються хімічними та енергетичними підприємствами, попит на які зростатиме. Кожний з цих видів матиме свої структурні і морфологічні особливості, фізико-механічні та хімічні властивості. Крім складу сполучників і мікросфер на експлуатаційні властивості впливатиме упорядкованість мікросфер у об'ємі композицій.

1. Аналіз технологічних питань та формулювання проблеми досліджень

1.1. Технологічні можливості упорядкованого пакування мікросфер у складі композицій

Відомі технології створення композиційних матеріалів за їх участю ґрунтуються на:

– введенні їх до складу каучуків задля отримання триботехнічних матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя ковзання та малою швидкістю зношування;

- додаванні їх у цементні склади тонкошарових будівельних сумішей з підвищеними адсорбційними властивостями;
- утворенні водно-дисперсійних складів, використання яких спрямовано на регулювання процесів паропроникнення і водопоглинання;
- змішуванні металізованих скляних мікросфер з суспензіями для отримання теплозахисних покриттів з ефектом екранування від електромагнітних випромінювань;
- формуванні синтактичних пін на основі термореактивних полімерів, які застосовуються для виготовлення відповідальних елементів і деталей засобів морської, підводної, аерокосмічної техніки.

Так, у триботехнічних матеріалах алюмосилікатні порожнисті мікросфери (АСПМ), якщо вони знаходяться на поверхні тертя¹, являють собою «захисний екран від подальшого зношування». Масовий вміст АСПМ у складі бутадієн-стирольної гумової суміші знаходиться у межах 2...8%. Для підвищення теплоізоляційних властивостей мінеральних в'язучих або полімерних штукатурних покриттів наповнення порожнистими скляними або алюмосилікатними мікросферами зростатиме до 90%², що пояснюється особливостями механізмів теплопередачі в об'ємі суцільного композиту. Завдяки склоподібним поверхням мікросфер перенос тепла відбувається від нагрітих поверхонь до холодних через електромагнітні хвилі (фотони), ефект від яких посилюється віддзеркаленням основних типів випромінювань і конвективними процесами по повітрю. Збільшення коефіцієнту заповнення об'єму мікросферами сприятиме підвищенню здатності «розсіювання радіаційної складової» теплового потоку, який падає на декоративну поверхню енергозберігаючого покриття фасаду будівель³. Цей ефект значно посилюється в результаті застосування металізованих мікросфер⁴. Автори⁵ зосереджують увагу на рівномірному

¹ Півоваров О. А., Павленко А. А. Інноваційне застосування алюмосилікатних мікросфер (ценосфер) як ефективного наповнювача в композиційні матеріали. *Наука, технології, інновації*. 2023. № 2. С.48-56. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-2-06>

² Плахотніков К. В., Деденьова О. Б., Бодаренко О. І. Адсорбційні властивості алюмосилікатних мікросфер у цементному композиті. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 92. № 2. С. 219-225. DOI: [10.29295/2311-7257-2018-92-2-219-225](http://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-92-2-219-225)

³ Саєнко Н. В., Биков О. О., Попов Ю. В., Демідов Д. В. Оцінка можливості застосування водно-дисперсних покриттів в якості декоративно-захисної обробки фасадів будівель. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture: Building materials and techniques*. 2020. № 79. Рр. 126-134 DOI: [10.31650/2415-377X-2020-79-126-134](http://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-126-134)

⁴ Сімбіркіна А. М., Хандецький В. С., Сverdліковська О. С., Черваков О. В. Безконтактні вимірювання провідності прототипів зовнішніх теплозахисних покриттів на основі металізованих скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2020. № 5. С. 81-87. DOI: [10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87](http://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87)

⁵ Гусакова К. Г., Трачевський В. В., Шульженко Д. М., Grande D., Файнлейб О. М. Синтактичні піни як композиційні матеріали для високотехнологічних галузей промисловості. *Полімерний журнал*. 2023. 45, № 3. С. 181–194 DOI: <https://doi.org/10.15407/polymerj.45.0>

розподілі скляних мікросфер у об'ємі полімерної матриці і залежності гідростатичної міцності та інших функціональних властивостей синтактичних пін від коефіцієнта пакування мікросфер, який може сягати 0,9. Більшість технологій створення композиційних матеріалів можна назвати «холодними» або «теплыми», де температурні параметри просочення не перевищуватимуть 60...90 °С, що є енергоефективним та позитивно впливатимуть на зберігання мікросферами сферичної форми, змочуваності їх сполучниками. Натомість суттєво змінити властивості і набути нового досвіду застосування композицій, наповнених скляними і керамічними мікросферами, можна шляхом застосування високотемпературних технологій, які дозволять міцно з'єднувати їх між собою та використовувати металеві компоненти.

1.2. Формулювання науково-технічної проблеми

та мети дослідження

На підставі проведеного аналізу літературних джерел в роботі сформульовано **науково-технічну проблему** розвитку технологій створення поліфункціональних композицій, наповнених неорганічними мікросферами.

Мета дослідження – ґрунтовний аналіз, узагальнення можливостей застосування високотемпературних технологій для отримання композиційних матеріалів за участю порожнистих скляних і алюмосилікатних мікросфер з визначенням проблемних питань, переваг, недоліків, фізико-хімічних процесів як науково-технічних передумов щодо їх розвитку.

Об'єкт досліджень – фізико-хімічні процеси формування композиційних матеріалів і покриттів, до складу яких входять порожнисті скляні і алюмосилікатні мікросфери.

Предмет досліджень – технології спікання та електродугового напilenня для формування композиційних матеріалів і покриттів з участю мікросфер.

1.3. Матеріали для отримання експериментальних зразків

Експериментальні роботи полягали у отриманні та дослідженні партії пробних зразків:

- спечених без сполучника скляних мікросфер;
- спечених скляних мікросфер з порошком (пудрою) алюмінію;
- електродугових покриттів, наповнених скляними мікросферами;
- електродугових покриттів, наповнених алюмосилікатними мікросферами.

В технологіях використано порожнисті скляні мікросфери (PCM) виробництва фірми «ЗМС» (офіційним дистриб'ютором компанії «ЗМ»

в Україні є фірма INTA 3M) та АСПМ зольні марки МПк200-400 (ТОВ «Виробниче об'єднання Мікросфери», Україна). Хімічний склад вихідних матеріалів, які застосовано для отримання експериментальних зразків наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних матеріалів

Матеріали	Опосередкований хімічний склад, мас.%,%
Для технологій спікання скляних мікросфер без сполучника	
Скляні мікросфери системи Na ₂ O–B ₂ O ₃ –SiO ₂	SiO ₂ – 69,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; CaO – 6,0; B ₂ O ₃ – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃
Скляні мікросфери системи Na ₂ O–SiO ₂	SiO ₂ – 77,0; Na ₂ O ₃ – 23,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃
Для технологій спікання скляних мікросфер з порошком алюмінію	
Скляні мікросфери системи Na ₂ O–B ₂ O ₃ –SiO ₂	SiO ₂ – 69,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; CaO – 6,0; B ₂ O ₃ – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃
Порошок алюмінію, ДСТУ 6058-73 (зокрема марки ПА-4)	Al – 98,8; Fe – 0,35; Si – 0,4; Cu – 0,02
Пудра алюмінію ДСТУ 5494-95 (зокрема марки АПС-1А)	Al – 99,8; Fe – 0,2
Для формування покриттів, наповнених мікросферами	
Сталева підкладка	
Ст3 (ГОСТ 380-2005)	C – 0,14...0,22; Mn – 0,30...0,60; Si – не більше 0,05; Fe – основа
Зварювальний дріт	
65Г (за вмістом Mn близька до AISI 1066/1070)	C – 0,62...0,7%; Si – 0,17...0,37%; Mn – 0,9...1,2%; Cr не більше 0,25%; Fe – основа
Св-08 (ISO 14341-A-G 4Si1) Св-08Г2С (ISO 14341-A-G3Si1)	C – 0,5...0,12%; Si – 0,17...0,37%; Mn – 0,35...0,65%; Cr не більше 0,1%; Fe – основа C – 0,05...0,11; Si – 0,70...0,95; Mn – 1,80...2,0; Cr – до 0,20; Ni – до 0,25; S – до 0,025; P – до 0,03
СвАМг-5 (ER 5356 / AWS A5.10)	Mg – 5,0; Fe – до 0,4; Cr – 0,12 ; Mn – 0,15; Si – до 0,25; решта – Al
Наповнювач	
Алюмослікатні мікросфери	SiO ₂ – 74,9%; Al ₂ O ₃ – 13,9%; K ₂ O – 2,8%; Na ₂ O – 1,9%; Fe ₂ O ₃ – 0,9%; CaO – 1,2%; FeO – 0,6%; TiO ₂ – 0,2% Склад газової фази в середині мікросфер: CO ₂ – 70%; N ₂ – 30%
Скляні мікросфери	SiO ₂ – 69,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; CaO – 6,0; B ₂ O ₃ – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃

Джерело: таблицю складено автором.

2. Технологічна ланка отримання і експлуатаційна спрямованість композиційних матеріалів і покриттів

Проаналізуємо «лінійку» розроблених композиційних матеріалів і покриттів (рис. 1): їх технологічні особливості, структуру, застосування.

«Синтактичне піноскло» – таку авторську назву отримав легковажний композиційний матеріал, який складається лише з одних скляних мікросфер, спечених без сполучників. Експериментальні роботи проводилися з ПСМ натрійборсилікатного і натрійсилікатного складу; їх хімічний склад наведено у табл. 1. Завдяки варіювання температурно-деформаційними і часовими параметрами⁶, можна отримувати композит щільністю 320...360 кг/м³, який здатний витримувати всебічний гідростатичний тиск до 40...45 МПа. Рекомендована технологічна послідовність складається з операцій:

- дозування скляних мікросфер масовим або об'ємним способом;
- їх вібраційного ущільнення, яке сприятиме більш компактному пакуванню мікросфер різного діаметра (20...100 мкм), де більш дрібні частинки розташовуються між частинками більшого діаметру, утворюючи механічний зв'язок;

- спікання мікросфер у декілька етапів з температурою кінцевої ізотермічної витримки 600...650 °С. На певній стадії прогрівання порошкове тіло можна підпресовувати невеликим тиском (0,2...1,2 МПа), що сприятиме умовам контактного припікання скляних частинок за рахунок розм'якшення найбільш легкотопкої склафази у стінці мікросфери.

Формування щільного каркасу відбувається шляхом утворення міжчасткових контактних площин, як це показано на фрагменті мікроструктури (рис. 1, оптичну мікрофотографію зроблено у темному полі на мікроскопі ММР-2Р при збільшенні 360 разів). Підібрані технологічні режими сприятимуть зберіганню скляними частинками форми, максимально наближеної до сферичної та формуванню певної відкритої пористості (7...20%) у структурі матеріалу. Це зумовлює поєднання гідростатичної міцності з теплоізоляційної здатністю композиту ($\lambda = 0,031...0,50$ Вт/(м·К) в діапазоні температур 25...400 °С, що дозволяє рекомендувати його для обладнання засобів морської і підводної техніки⁷.

⁶ Казимиренко Ю. О., Гайдаєнко О. В. Комп'ютерне моделювання розподілу температур спікання скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2024. № 3. С. 67-74. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-154-3-67-74

⁷ Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining materials for underwater technical equipment. *POLISH MARITIME RESEARCH*. 2023. 3 (119). Vol. 30. Pp. 174-180. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0050>

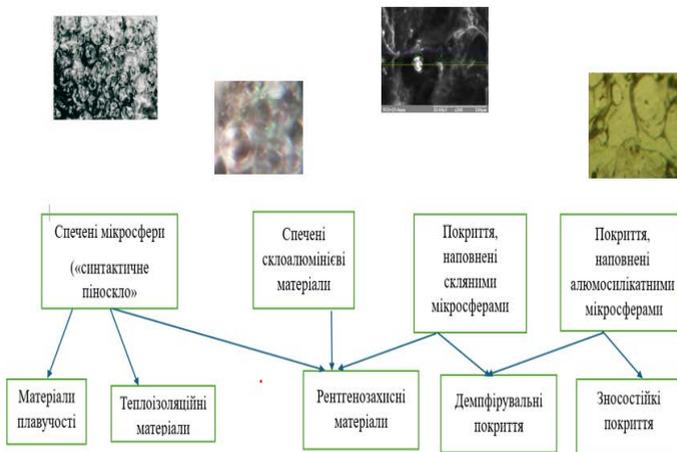


Рис. 1. «Лінійка» матеріалів і покриттів, наповнених мікросферами

[складено автором]

Спечені склоалюмінієві матеріали виготовляються за аналогічною методикою, що й «синтактичне піноскло». До певного навішення скляних мікросфер додається 50% (об'ємн.) порошку або пудри алюмінію (хімічний склад наведено у табл. 1). Технологічна задача полягатиме у формуванні щільно спеченої композиції з почерговим розташуванням компонентів: алюміній–скляна мікросфера: на рис. 1 наведено фрагмент оптичної мікрофотографії, зробленої за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-И зі збільшенням у 500 разів. Така структура забезпечує підвищені рентгенозахисні властивості матеріалів⁸; питомий свинцевий еквівалент (відношення свинцевого еквіваленту до товщини зразку) становить 0,45...0,6; для «синтактичного піноскла» питомий свинцевий еквівалент складатиме 0,14. Автором досліджено потрійний ефект поглинання скляною порожнистою мікросферою потоку іонізуючих випромінювань (стінка мікросфери–SO₃–стінка мікросфери), який також притаманний для метал-скляних матеріалів і покриттів і пояснює зростання рентгенозахисних властивостей і радіаційної стійкості композицій зі збільшенням у їх об'ємі ПСМ⁹. На локальних ділянках між

⁸ Казимиренко Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій технічних засобів перевезення радіоактивних речовин. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2013. № 8. С. 134–140.

⁹ Kazymyrenko Y. Patterns and Mechanisms of interaction of Radioactive Cargo Radiation with Metal-Glass Layer of Watercrats Structure. *The advanced science journal*. 2014. Iss. 12. P. 45–48

мікросферами утворюються субмікрокристалічні області, які додатково поглинають енергію випромінювань. Наявність пористості збільшує анізотропію металевої матриці і сприятиме багаторазовому розсіюванню променів. У складі метал-скляних композицій скляна мікросфера набуває ефекту «металізації», який посилює здатність послаблювати дифузійний потік падаючих променів і пояснює підвищені рентгенозахисні властивості у порівнянні з «синтактичним піносклом».

Описані процеси є характерними й для *метал-скляних електродугових покриттів*. Потрапляючи у зону дуги під час електродугового напилення порожниста скляна мікросфера обволікається розплавленим металом і через низьку щільність спливає на поверхню покриття. Тому під час мікроструктурних досліджень поперечних шліфів виявляється занижена їх концентрація (до 11%), основний вміст скляних мікросфер ($35\pm 7\%$) спостерігається на поверхні напиленого на сталеву підкладку зразку. Це пояснює здатність розроблених покриттів захищати від дії випромінювань поверхню конструкцій майже удвічі у порівнянні з покриттями без наповнювача. Питомий свинцевий еквівалент покриттів композиції Св-АМ5-ПСМ складатиме 0,75; для композиції Св-08Г2С- ПСМ – 0,55, що пояснюється відбивною здатністю алюмінію. Проте сталеві покриття характеризуються підвищеною зносостійкістю і демпфувальною здатністю¹⁰. Під час короткочасного потрапляння у зону дуги мікросфери зберігають сферичну форму, як це підтверджує фрагмент електронної мікрофотографії на рис. 3 (зроблено за допомогою рентгенівського мікроскопа-мікроаналізатора РЕМА-102-02).

Експериментальні дослідження з формування *електродугових покриттів* з суцільнотягнутих дротів Св-08Г2С, Св-08Г2, 65Г (хімічний склад наведено у табл. 1), *наповнених алюмосилікатними порожнистими мікросферами* показали доцільність їх подальшого використання в умовах тертя¹¹, підвищених температур і хімічно активних середовищ¹². Мікросфери, потрапляючи у зону електричної дуги, зберігають форму сферичною (фрагмент оптичної мікрофотографії, зробленої за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-И зі збільшенням у 500 разів, наведено на рис. 1), не

¹⁰ Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю. Теоретичні передумови експлуатації конструкцій з метал-скляними захисними покриттями в умовах суднових вібрацій. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1. С. 175-185. DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.175-185

¹¹ Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Застосування зольних мікросфер для формування композиційних покриттів на сталевій поверхні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). № 3. С. 81-86. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/13>

¹² Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами. *Технічні науки та технології*. 2022. № 1(27). С. 38-44 DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-38-44

змінюють свого хімічного складу, не утворюють склофазы і не вступають у взаємодію з матеріалом сталевий матриці. Як і у випадку формування електродугових покриттів, наповнених скляними мікросферами, АСМП сконцентровані на їх поверхні і утворюють ефект підвищеної зносостійкості, який найбільш очевидний для покриттів композиції 65Г–АСМП 65Г¹³. Значення мікротвердості ($H\mu_{50} = 3,59$ ГПа) перевищує мікротвердість покриття з 65Г приблизно на 17%. Підвищена на 10 % пористість не вважається недоліком або дефектом, а є сприятливою для просоченням мастилом задля подальшої роботи в умовах тертя.

3. Фізико-хімічні процеси структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів

В основу пояснення фізико-хімічних процеси формування композиційних матеріалів і покриттів покладено:

- теоретичні і технологічні напрацювання науковців з дифузійного зварювання силалів з металами¹⁴;
- фізико-хімічне обґрунтування процесу змочування скла краплями розплавленого металу задля отримання міцного паяного з'єднання¹⁵;
- структурно-хімічна теорія склування скляних розплавів, започаткована Р.Л. Мюллером¹⁶ і розвинута на протязі багатьох років науковцями з області створення спеціальних видів стеклол¹⁷ і досліджень їх функціональних властивостей¹⁸;
- основні положення механіки структурно-неоднорідних матеріалів¹⁹;

¹³ Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Перспективи застосування покриття з 65Г, наповненого алюмосилікатними мікросферами, у суднобудівних технологіях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2022, Том 33 (72), 6, С. 8-12. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/02>

¹⁴ Березін Л. Я., Ганєєв Т. Р. Особливості технології зварювання вузлів мідь–алюміній–силал. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 7 (71). С. 158-163.

¹⁵ Красовський В. П., Габ І. І., Стецюк Т. В., Красовська Н.О. Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія розплавів і пайка металів*. 2017. Вип. 50. С. 18-27.

¹⁶ Stefan Reinsch. Oberflächenkeimbildung von Silikatgläsern der Stöchiometrie des Cordierits und des Diopsids. Berlin. 2001. 121 s.

¹⁷ Стронський О. В., Венгер Є. Ф., Олексенко П. Ф., Мельничук О. В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: властивості та практичні застосування : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 236 с.

¹⁸ . Плем'яників М. М., Жданюк Н. В. Нові склоподібні матеріали і методи їх синтезу. *Склоподібні матеріали і виробы. Функціональні матеріали*. [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 100 с.

¹⁹ Міленін С. О., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Повторак Н. І. Скінчено-елементні методи оцінки технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 2. С. 14-19 DOI: <https://doi.org/10.37434/dnk2021.02.02>

– наукові уявлення про поверхневі явища у мікрогетерогенних і дисперсних системах²⁰.

В табл. 2 узагальнено проблемні питання формування певної структури матеріалів і покриттів, яку необхідно отримати протягом технологічного циклу задля формування необхідних експлуатаційних властивостей. Для їх вирішення автором розроблено технологічні рекомендації, які також наведені у таблиці.

Таблиця 2

Проблемні питання структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів і технологічні рекомендації щодо їх вирішення

Проблемні питання структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів	Практичні рекомендації
Спінання без сполучників скляних мікросфер	
Утворення рідкої фази під час контактного прип'якання скляних частинок	Застосування технології гарячого пресування з прикладанням невеликого тиску ($P = 0,2 \dots 1,2$ МПа) до попередньо розігрітої формовки
Низький ступінь спікаємості скляних мікросфер	Контроль за усадочними процесами протягом всього технологічного циклу і остигання спеченого тіла разом з формою і піччю
Порушення мікросферами сферичної форми при перевищенні термодформаційних параметрів ($t \geq 650$ °C; $P \geq 1,2$ МПа)	Аналіз мікроструктури, ретельне контролювання термо-деформаційних і часових параметрів
Високий відсоток (до 25...30%) відкритої пористості у об'ємі спеченого матеріалу	Застосування віброутрушування навішання скляних мікросфер та застосування невеликих тисків гарячого пресування
Спінання скляних мікросфер з металами	
Різниця у значеннях коефіцієнтів термічного розширення (КТР) металу і скла	Зняття міжфазних напружень шляхом остигання спеченого тіла разом з формою і піччю
Окиснювальні процеси у металевих порошках	Реалізація процесу спікання у інертному середовищі або у контейнері, виготовленого з термічно необробленого графіту
Втрата скляними мікросферами сферичної форми при підвищенні температури	Застосування режимів поступового прогрівання порошкових сумішей, контроль за рівномірним розподілом температур у пресовці
Рівномірний розподіл рідкої фази	Застосування під час спікання невеликих тисків пресування, зокрема на температурних етапах проміжних витримок

²⁰ Мчедов-Петросян М.О., Лебідь В.І., Глазкова О.М., Лебідь О.В. Колоїдна хімія: підручник. 2- вид., випр. і доповн. Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 500 с.

Продовження таблиці 2

Проблемні питання структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів	Практичні рекомендації
Витікання металевої складової	Вибір металевих порошків з достатньо широким діапазоном плавлення
Додавання скляних мікросфер до складу електродугових покриттів	
Нерівномірний розподіл скляних мікросфер по об'єму покриття	Структурний дефект є невіправним, проте не суттєво впливає на експлуатаційні властивості
Низький коефіцієнт заповнення об'єму покриття скляними мікросферами	Структурний дефект є невіправним. Збільшення об'ємного вмісту мікросфер у складі покриттів знижує рентенозахисні властивості, проте підвищує міцність зчеплення з підкладкою
Додавання алюмосилікатних мікросфер до складу електродугових покриттів	
Нерівномірний розподіл алюмосилікатних мікросфер по поверхні покриття	Структурний дефект є невіправним, проте не суттєво впливає на експлуатаційні властивості
Викришування алюмосилікатних мікросфер з металевої матриці через низьку когезійну міцність	Застосування додаткового дифузійного випалу або просочення пористої поверхні покриття легкоплавкими компонентами

Джерело: складено автором

Результати теоретичних і експериментальних досліджень показали перспективи розвитку високотемпературних технологій для одержання нових конкурентоспроможних матеріалів покриттів, наповнених скляними і алюмосилікатними мікросферами. Проте на даний час проблемним питанням, яке потребує подальшої розробки, є енергоефективність обладнання, необхідність його удосконалення і модернізації.

ВИСНОВКИ

Порожністі скляні і алюмосилікатні мікросфери є перспективною вихідною сировиною для створення поліфункціональних композиційних матеріалів, які одночасно поєднують у собі теплоізоляційні, антифрикційні, міцнісні та інші властивості, які регулюються пакуванням або раціональним розподіленням мікросфер по об'єму та поверхні композитів.

Конкурентоспроможними технологіями отримання композиційних матеріалів і покриттів за участю скляних і керамічних мікросфер є різновиди спікання та газотермічного напilenня по сталевій поверхні.

Експериментально отримано і досліджено спробні зразки, які складаються зі спечених без сполучника скляних мікросфер; спечених скляних мікросфер з порошком (пудрою) алюмінію; електродугових

покриттів, наповнених скляними мікросферами та електродугових покриттів, наповнених керамічними мікросферами.

Визначено зв'язок між структурними особливостями отриманих матеріалів, геометричним пакуванням мікросфер у їх складі та функціональним призначенням.

Проаналізовано проблемні питання структуроутворення розроблених матеріалів і покриттів та запропоновано практичні рекомендації щодо їх вирішення.

Науково-практичне значення одержаних результатів полягатиме у створенні науково-технічних передумов для отримання нових конкурентоспроможних композиційних матеріалів і покриттів з порожнистих скляних і алюмосилікатних мікросфер, використовуючи для цього високотемпературні технології.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням технологічних можливостей створення функціональних матеріалів для суднобудування і об'єктів морської інфраструктури.

АНОТАЦІЯ

Сучасний ринок хімічної промисловості створює велике різноманіття неорганічних мікросфер, за участю яких виготовляються легковажні композиційні матеріали і покриття для суднобудування і морської техніки, авіабудування, галузей енергетики тощо. Їх властивості залежать не тільки від складу компонентів, а й від характеру розподілення мікросфер по об'єму та поверхні матеріалу, а також щільності їх пакування у композиціях. На відміну від відомих технологій, де порожнисті скляні або алюмосилікатні мікросфери з'єднуються з полімерними або в'язучими речовинами, впровадження високотемпературних технологій дає змогу поєднувати їх з металами, створюючи матеріали з новими властивостями. Спінанням скляних мікросфер без сполучників можна одержувати легковажні композиційні матеріали, які складаються виключно з одних мікросфер і поєднують у собі теплоізоляційну здатність і гідростатичну міцність, що зумовлює їх застосування для виготовлення підводних технічних засобів і плавучих об'єктів. З'єднанням спінанням скляних мікросфер з порошком або пудрою алюмінію і додавання їх до складу алюмінієвих і сталевих електродугових покриттів дає змогу формувати радіаційно захисні композиції з підвищеними рентгенозахисними властивостями, які знайшли своє застосування для виготовлення елементів суден для радіоактивних вантажів. Наповнення сталевих покриттів порожнистими скляними і алюмосилікатними мікросферами надає їм демпфувальних властивостей, зносостійкості, термо- і корозійної стійкості, що є дуже важливим

для сучасного машинобудування. Проаналізовано проблемні питання структуроутворення розроблених матеріалів і покриттів та запропоновано практичні рекомендації щодо їх вирішення. Науково-практичне значення одержаних результатів полягатиме у створенні науково-технічних передумов для отримання нових конкурентоспроможних композиційних матеріалів і покриттів з порожнистих скляних і алюмосилікатних мікросфер, використовуючи для цього високотемпературні технології. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням технологічних можливостей створення функціональних матеріалів для суднобудування і об'єктів морської інфраструктури.

Література

1. Півоваров О. А., Павленко А. А. Інноваційне застосування алюмосилікатних мікросфер (ценосфер) як ефективного наповнювача в композиційні матеріали. *Наука, технології, інновації*. 2023. № 2. С.48-56. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-2-06>
2. Плахотніков К. В., Деденьова О. Б., Бодаренко О. І. Адсорбційні властивості алюмосилікатних мікросфер у цементному композиті. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 92. № 2 С. 219-225. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-219-225
3. Саєнко Н. В., Биков О. О., Попов Ю. В., Демідов Д. В. Оцінка можливості застосування водно-дисперсних покриттів в якості декоративно-захисної обробки фасадів будівель. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture: Building materials and techniques*. 2020. № 79. Рр. 126-134 DOI: 10.31650/2415-377X-2020-79-126-134
4. Сімбіркіна А. М., Хандецький В. С., Свердліковська О. С., Черваков О. В. Безконтактні вимірювання провідності прототипів зовнішніх теплозахисних покриттів на основі металізованих скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2020. № 5. С. 81-87. DOI: 10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87
5. Гусакова К. Г., Трачевський В. В., Шульженко Д. М., Гранде Д., Файнлейб О. М. Синтактні піни як композиційні матеріали для високотехнологічних галузей промисловості. *Полімерний журнал*. 2023. 45, № 3. С. 181-194 DOI: <https://doi.org/10.15407/polymerj.45.0>
6. Казимиренко Ю. О., Гайдаєнко О. В. Комп'ютерне моделювання розподілу температур спікання скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2024. № 3. С. 67-74. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-154-3-67-74
7. Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining

materials for underwater technical equipment. *POLISH MARITIME RESEARCH*. 2023. 3 (119). Vol. 30. Pp. 174-180. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0050>

8. Казимиренко Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій технічних засобів перевезення радіоактивних речовин. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013. № 8. С. 134–140.

9. Kazymyrenko Y. Patterns and Mechanisms of interaction of Radioactive Cargo Radiation with Metal-Glass Layer of Watercrafts Structure. *The advanced science journal*. 2014. Iss. 12. P. 45–48. URL: https://www.researchgate.net/publication/287570622_Patterns_and_Mechanisms_of_Interaction_of_Radioactive_Cargo_Radiation_with_Metal-Glass_Layer_of_Watercrafts_Structure

10. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю. Теоретичні передумови експлуатації конструкцій з метал-скляними захисними покриттями в умовах суднових вібрацій. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1. С. 175-185. DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.175-185

11. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Застосування зольних мікросфер для формування композиційних покриттів на сталевій поверхні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). № 3. С. 81-86. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/13>

12. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами. *Технічні науки та технології*. 2022. № 1(27). С. 38-44 DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-38-44

13. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Перспективи застосування покриття з 65Г, наповненого алюмосилікатними мікросферами, у суднобудівних технологіях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2022, Том 33 (72), 6, С. 8-12. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/02>

14. Березін Л. Я., Ганєєв Т. Р. Особливості технології зварювання вузлів мідь–алюміній–ситал. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 7 (71). С. 158-163. URL:<http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/7416>

15. Красовський В. П., Габ І. І., Стецюк Т. В., Красовська Н.О. Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія розплавів і пайка металів*. 2017. Вип. 50. С. 18-27. URL:<https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/4ba050b1-286a-48a9-83cf-e195cb292ae5>

16. Stefan Reinsch. Oberflächenkeimbildung von Silikatgläsern der Stöchiometrie des Cordierits und des Diopsids. Berlin. 2001. 121 s. URL:https://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/tu-berlin/diss/2001/reinsch_stefan.pdf

17. Стронський О. В., Венгер Є. Ф., Олексенко П. Ф., Мельничук О. В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: властивості та практичні застосування : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 236 с. URL: <https://www.researchgate.net/profile>

18. Племянніков М. М., Жданюк Н. В. Нові склоподібні матеріали і методи їх синтезу. *Склоподібні матеріали і виробу. Функціональні матеріали*. [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 100 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/51ff9424-a1ec-45b8-a8c0-b502aa75eb8d/content>

19. Міленін С. О., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Повторак Н. І. Скінчено-елементні методи оцінки технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 2. С. 14-19 DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.02>

20. Мчедов-Петросян М.О., Лебідь В.І., Глазкова О.М., Лебідь О.В. Колоїдна хімія: підручник: 2- вид., випр. і доповн. Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 500 с. URL: <https://chemistry.karazin.ua>

Information about the author:

Kazymyrenko Yuliia Oleksiivna,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Materials Science and Technology of Metals,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
9, Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, 54025, Ukraine